

EOF 分解方法反演海浪参数的有效性研究^{*}

Validation of the Empirical Orthogonal Function Method to Retrieve Ocean Wave Parameters

陈忠彪, 何宜军, 丘仲锋, 张彪

CHEN Zhong-biao, HE Yi-jun, QIU Zhong-feng, ZHANG Biao

(南京信息工程大学海洋科学学院, 江苏省海洋环境探测工程技术研究中心, 江苏南京 210044)
(Jiangsu Engineering Technology Research Center of Marine Environment Detection, School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu, 210044, China)

摘要:【目的】进一步确认经验正交函数(EOF)分解处理导航 X 波段雷达图像序列方法的有效性。【方法】基于两套导航 X 波段雷达同步观测的实验数据, 利用经验正交函数分解算法反演海浪的有效波高(SWH)、峰值周期、主波波向和主波波长。【结果】4 种参数均方根误差分别为 0.1~0.2 m, 0.6~0.9 s, 5.01° 和 7.09 m。【结论】经验正交函数分解反演不同海浪参数的方法适用于处理近岸海区的非均匀波浪场。

关键词: 导航 X 波段 EOF 反演 近岸 海浪

中图分类号: P731.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9164(2015)03-0337-04

Abstract:【Objective】A new proposed algorithm based on empirical orthogonal function (EOF) to process X-band marine radar image sequences was validated.【Methods】By using the experimental data measured simultaneously by two X-band marine radar systems, different wave parameters were retrieved and compared.【Results】The root-mean-square errors of the significant wave height, peak wave period, main wave direction and main wavelength between the two radar systems were 0.1~0.2 m, 0.6~0.9 s, 5.01° and 7.09 m, respectively.【Conclusion】This algorithm is suitable to be used in the heterogeneous wave field at nearshore region.

Key words: X-band marine radar, EOF, retrieval, nearshore, ocean wave

0 引言

【研究意义】海浪对人们的生产和生活有重要影响, 如海洋工程、渔业生产、水产养殖和航行运输等都要考虑海浪的作用。同时, 海浪处于海洋和大气的交

界面, 对海气能量交换、气候变化也有一定的影响。传统观测海浪的仪器如浮标, 能精确获得海浪的信息, 但是它只能测量一个点的变化, 不能全面反映观测海区的海浪状况, 并且受水深、海况、天气状况等因素的影响, 仪器的布放和回收困难。近年来, 导航 X 波段以其高时间、空间分辨率, 全天时、全天候的优点被越来越多地应用于近岸海洋环境的观测, 包括海浪^[1]、海流^[2,3]、地形^[4]和海面风场^[5]等。【前人研究进展】导航 X 波段雷达以掠射角向海面发射电磁波, 海面上由风产生的小尺度粗糙度和毛细波与电磁波发生 Bragg 共振散射^[6], 这种散射又被海表面的长重力波调制, 从而可以对海浪成像, 在雷达图像上将其显示为“海杂波”。利用导航 X 波段雷达图像序列反

收稿日期: 2015-05-18

修回日期: 2015-05-28

作者简介: 陈忠彪(1987-), 男, 讲师, 主要从事海洋微波遥感研究。

^{*} 南京信息工程大学人才启动基金项目(编号: 2241061301078), 江苏省自然科学基金项目(BK2011008)和江苏省高等教育优势学科项目资助。

演的海浪参数主要包括海浪的有效波高(SWH)、峰值周期、主波波向和主波波长。现有的海浪参数处理方法一般是基于海浪谱理论。首先对雷达图像序列作三维快速傅里叶变换(FFT)得到雷达图像谱,然后利用频散关系滤除图像谱中与海浪无关的能量,得到三维频率方向谱^[1]。由于导航 X 波段雷达对海面成像时受到多种调制机制的影响,利用雷达图像序列反演的频率方向谱与实际的海浪谱存在差别,需要先使用调制传递函数来消除二者之间的差别^[7],再根据海浪的频散关系理论和谱的峰值位置来确定海浪的峰值周期、主波波长和主波波向^[8,9]。对于有效波高的反演,由于导航 X 波段雷达在成像时没有经过辐射定标,雷达图像的灰度值不能直接反映海面的高度,所以一般是借助于合成孔径雷达成像时有效波高与信噪比的线性关系^[10,11],但是由于导航 X 波段雷达与合成孔径雷达成像机制有很大差别,这一理论对于导航 X 波段雷达并不成立,所以只能作为经验关系。尽管基于三维傅里叶变换的海浪谱方法已得到广泛的应用,但是它仍然存在几个问题:(1)调制传递函数受到极化方式、入射角、海况和气象状况等因素的影响,不易准确确定;(2)三维傅里叶变换是建立在波浪场的空间均匀性和时间稳定性的假设上,而这种情况在真实海区中很少存在,尤其是近岸区域;(3)线性频散关系不适用于近岸海区。在近岸海区,随着水深的变浅以及岸对波浪的反射、折射等作用,波浪场一般都是不均匀的,从而导致海浪谱方法的精度不高,如文献^[12]的研究发现,FFT 方法会损失波浪场的空间变化信息。为了克服三维傅里叶变换方法中波浪场的空间均匀性和时间稳定性假设的缺点,有人提出利用小波分析处理 X 波段雷达图像序列的方法^[13,14],但是目前还没有建立小波谱与有效波高之间的关系。**【本研究切入点】**最近文献^[15]提出利用经验正交函数(EOF)分解处理导航 X 波段雷达图像序列的方法,但是该方法的有效性还需进一步验证。**【拟解决的关键问题】**利用两台不同的导航 X 波段雷达同步观测的数据,通过比较不同雷达的反演结果对文献^[15]中的方法进行验证。

1 方法和数据

1.1 处理方法

基本反演步骤可参见文献^[15]:对导航 X 波段雷达图像序列作经验正交函数分解,得到波浪场的不同空间模态和对应的主成分;选取一个主成分,利用其标准差反演海浪的有效波高;选取第一主成分,根据 Burg 算法求第一主成分的最大熵功率谱,谱的峰

值对应的频率是海浪的峰值频率,峰值频率的倒数即为海浪的峰值周期;在相互垂直的两个方向选取雷达图像序列,分别作 EOF 分解,根据 Burg 算法求这两个方向的波浪的空间变化的主成分,然后选取两个方向的第一主成分,根据几何关系计算海浪的主波波长和主波波向。需要注意:(1)由于导航 X 波段雷达图像没有经过定标,所以反演有效波高时需要先用浮标等数据定标;(2)确定海浪的主波波向时,需要利用相邻两幅或者几幅雷达图像的图像谱来消除方向的 180°模糊。

1.2 实验数据

2013 年 10 月 31 日至 2013 年 12 月 12 日,用两套导航 X 波段雷达海浪观测系统(简称为雷达 1 和雷达 2)同步观测相同海区。测试地点为福建省平潭县,雷达站的北边是陆地,南边是观测海区,风向一般为北风或者东北风。所用雷达的配置见表 1,两个雷达的天线在安装时相距一定的距离:水平方向相距 5 m,垂直方向的高度相差 3 m。测试期间两套雷达系统都是每隔 6~10 min 采集并处理一组雷达图像序列,这样每套雷达系统各采集 5787 组数据。图 1 给出雷达在 2013 年 11 月 4 日 23:50 采集的图像。

表 1 导航 X 波段雷达的基本配置参数

Table 1 Configurations of the X-band marine radars

参数 Parameters	数值 Value
极化方式 Polarization	VV
工作频率 Frequency	(9410±30)MHz
脉冲宽度 Pulse width	70 ns
脉冲重复频率 Pulse repetition frequency	3000 Hz
发射功率 Transmit power	25 KW
天线增益 Antenna gain	30.2 dB
天线波束宽度 Antenna beam width	水平方向 1.2°,垂直方向 20.5° 1.2°horizontally,20.5°vertically
天线类型 Antenna type	2.4 米缝隙波导天线 2.4-m slotted waveguide array
天线转速 Antenna rotation speed	24 r/min

为了充分比较雷达 1 和雷达 2 反演的有效波高、峰值周期,在观测海区选取 4 个不同的区域:A₁、A₂、A₃和 A₄(图 1 中用绿色虚线框标出的区域),4 个区

域的具体位置见表 2。由于反演主波波长和主波波向时需要分别计算海浪在两个垂直方向的分量,故对于它们的反演需要选择一个较大的区域,例如图 1 中的黄色虚线框标出的区域(方位角范围 $130^{\circ}\sim 156^{\circ}$, 径向距离范围 $825\sim 1785\text{ m}$)。

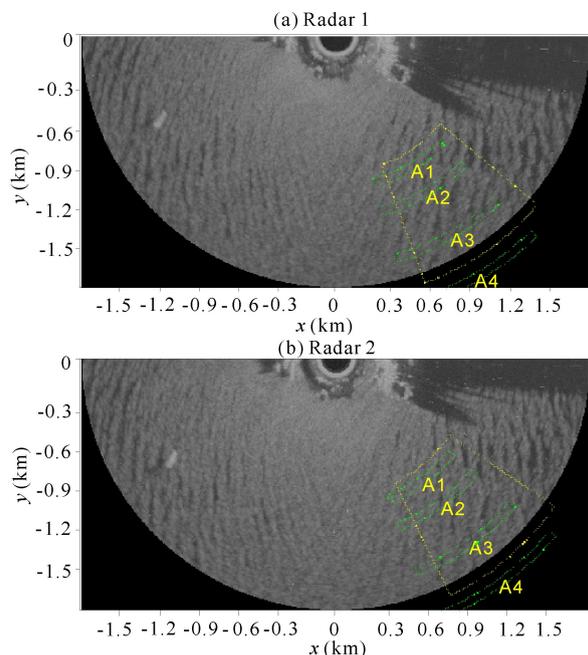


图 1 导航 X 波段雷达海浪观测系统采集的灰度值图像
Fig. 1 Two simultaneous gray-level images recorded by two X-band marine radar systems

表 2 用于反演海浪的有效波高和峰值周期海区的位置

Table 2 Locations of the studied regions in the retrieval of SWH and peak wave period

区域 Region	径向距离 Range(m)	方位角(度) Azimuth ($^{\circ}$)
A ₁	937.5~997.5	135~165
A ₂	1162.5~1222.5	135~165
A ₃	1537.5~1597.5	135~165
A ₄	1912.5~1972.5	135~165

2 结果分析

2.1 有效波高的比较

利用 EOF 分析方法将导航 X 波段雷达图像序列分解成不同的模态,通过有效波高与主成分的标准差之间的关系来反演有效波高。由于不同区域、不同模态的定标系数不同,而有效波高与主成分的标准差之间是线性关系,为比较雷达 1 和雷达 2 反演的有效波高的一致性,只需要比较两套雷达的各个主成分的标准差之间的相关系数,如图 2a 所示。

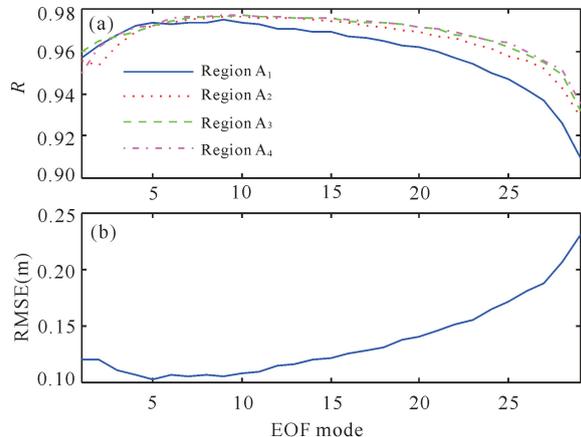


图 2 两套导航 X 波段雷达海浪观测系统反演的有效波高比较

Fig. 2 Comparison of the SWH measured by two X-band marine radar systems

(a)不同 EOF 模态之间的相关系数,(b)区域 A₁ 的有效波高的均方根误差。

(a) The correlation coefficient of different EOF modes, and (b) the RMSE of SWH between the measurements of two radars in Region A₁.

图 2a 的结果表明,利用 EOF 分解第 1~29 个主成分反演有效波高时,雷达 1 和雷达 2 反演的有效波高之间的相关系数都大于 0.9。对比 4 条曲线可以发现,用同一个主成分反演的有效波高随反演区域位置的变化很小,即有效波高的反演方法不受离雷达站距离(电磁波衰减)的影响。

由于反演区域 A₁ 的位置接近文献[15]实验中浮标的位置,在区域 A₁ 中对雷达 1 使用其中的定标系数,再用部分数据对雷达 2 在区域 A₁ 定标,比较定标后两个雷达反演的有效波高,其均方根误差(RMSE)和散点图分别如图 2b 和图 3a。图 2b 结果表明,使用雷达 1 和雷达 2 的不同主成分反演时,有效波高的均方根误差都小于 0.25 m,这进一步证明新提出的方法适合用于从导航 X 波段雷达图像序列中反演有效波高。

2.2 峰值周期的比较

雷达 1 和雷达 2 反演的峰值周期的均方根误差见表 3 和图 3b。从表 3 可以看出,两个雷达反演的峰值周期的均方根误差从区域 A₁~A₄ 逐渐减小,这表明峰值周期的反演方法受到离陆地的距离远近的影响。从图 1a 和图 1b 的雷达图像中可以看出,离岸较远的区域比离岸较近的区域中的海浪条纹更加清晰,这是由于陆地对电磁波的反射较强。另外,4 个反演区域的方位角范围都是 30° ,距离雷达站越远的位置对应的径向距离越大,即区域 A₁ 中包含的完整海浪波形更多,这可能也是该区域的反演结果较好的

原因之一。

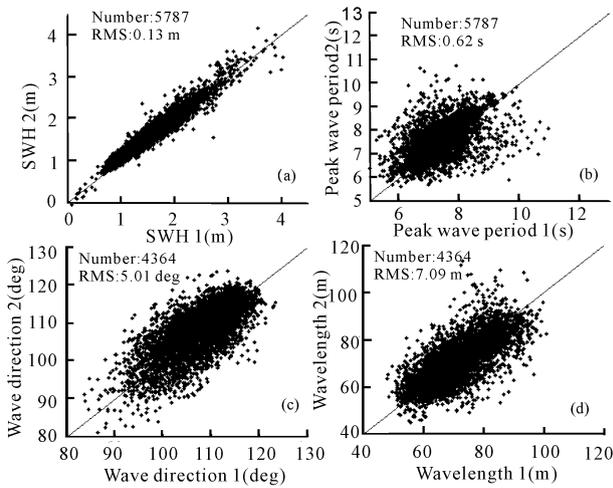


图3 利用两套导航 X 波段雷达海浪观测系统反演的不同海浪参数的比较

Fig. 3 Comparison of the ocean wave parameters measured by two X-band marine radar systems

(a)有效波高,(b)峰值周期,(c)主波波向,(d)主波波长。

(a)SWH,(b) peak wave period,(c) main wave direction and (d) main wavelength.

表3 不同区域中两套导航 X 波段雷达系统反演的峰值周期的均方根误差

Table 3 The RMSE of peak wave period between two X-band marine radar systems in different regions

区域 Region A ₁	区域 Region A ₂	区域 Region A ₃	区域 Region A ₄
0.90	0.77	0.70	0.62

2.3 主波波向和主波波长的比较

利用雷达 1 和雷达 2 采集的雷达图像序列反演的主波波向和主波波长的比较如图 3c 和图 3d 所示,去掉异常值后它们的均方根误差分别为 5.01° 和 7.09 m。反演主波波长和主波波向时,需要先分别反演预先选取的两个垂直方向的波长。在低海况时,由于雷达图像中的海浪信号较弱,一个甚至两个方向的主成分不能被正确提取(尤其是本实验中雷达图像的径向方向与海浪的波峰线接近平行),从而造成主波波向和主波波长的反演结果明显异常。对于实验中的海况(有效波高大部分在 0.6~3.5 m,图 3a),在所选取区域中反演的主波波向和主波波长的异常值大约占总数的 24.6%。

3 结论

本文利用两套独立的导航 X 波段海浪观测系统验证了文献[15]提出的海浪参数(有效波高、峰值周

期、主波波长和主波波向)的反演方法。根据上述分析得到如下结论:

(1)有效波高的反演方法不受陆地或者低海况时噪声的影响,使用雷达图像序列的不同主成分反演有效波高时的结果稳定;

(2)峰值周期的反演方法受陆地的影响,两套雷达系统反演的峰值周期的均方根误差大约为 0.6~0.9 s;

(3)主波波向和主波波长的反演方法受低海况的影响,去除低海况时的异常值后二者的均方根误差分别为 5.01° 和 7.09 m。

这说明利用经验正交函数分解处理导航 X 波段雷达图像序列的方法是稳定的,对不同雷达、不同观测海区、不同海况都有良好的适用性,尤其是有效波高。因此,文献[15]提出的海浪参数的反演方法适用于近岸海区海浪参数的反演。

参考文献:

[1] Young I R, Rosenthal W, Ziemer F. A three-dimensional analysis of marine radar images for the determination of ocean wave directionality and surface currents[J]. Journal of Geophysical Research, 1985, 90: 1049-1059.

[2] Senet C M, Seemann J, Ziemer F. The near-surface current velocity determined from image sequences of the sea surface[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39: 492-505.

[3] Senet C M, Seemann J, Flampouris S. Determination of bathymetric and current maps by the method DiSC based on the analysis of nautical X-band radar image sequences of the sea surface[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46: 2267-2279.

[4] Bell P S. Shallow water bathymetry derived from an analysis of X-band marine radar images of waves[J]. Coastal Engineering, 1999, 37: 513-527.

[5] Lund B, Graber H C, Romeiser R. Wind retrieval from shipborne nautical X-band radar data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50: 3800-3811.

[6] Valenzuela G R. Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves—a review[J]. Boundary-layer Meteorology, 1978, 13: 87-105.

[7] Nieto-Borge J C, Rodriguez G R, Hessner K, et al. Inversion of marine radar images for surface wave analysis[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2004, 21: 1291-1300.

[8] Cui L, He Y, Shen H, et al. Measurements of ocean wave and current field using dual polarized X-band radar[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2010, 28: 1021-1028.

(下转第 345 页 Continue on page 345)

- [7] 孙雪萍,任义,徐艳,等. 丛柳珊瑚 *Euplexaura rhipidialis* 中细胞毒活性二萜成分分析[J]. 广西科学,2013,20(4):269-271,275.
Sun X P, Ren Y, Xu Y, et al. Analysis of cytotoxic diterpenoid composition from the gorgonian coral *Euplexaura rhipidialis* [J]. Guangxi Sciences, 2013, 20(4):269-271, 275.
- [8] 葛岩,王医术,高婷,等. 槲寄生碱对低分化骨肉瘤 U₂OS 的抑制作用[J]. 吉林大学学报:医学版,2009,35(5):841-843.
Ge Y, Wang Y S, Gao T, et al. Inhibitory effect of mistletoe alkali on osteosarcoma cells [J]. Journal of Jilin University: Medicine Edition, 2009, 35(5):841-843.
- [9] Qi S H, Zhang S, Huang H. Purine alkaloids from the South China Sea gorgonian *Subergorgia suberosa* [J]. Journal Natural Product, 2008, 71:716-718.
- [10] Rapp M, Cai X, Xu W, et al. Reactions of trimethylsilyl fluorosulfonyl difluoroacetate with purine and pyrimidine nucleosides [J]. Journal of Fluorine Chemistry, 2009, 130(3):321-328.
- [11] Still I W J, Plavac N, McKinnon D M, et al. Carbon-13 nuclear magnetic resonance spectra of N-, O-, and S-methylated uracil and thiouracil derivatives [J]. Canadian Journal of Chemistry, 1978, 56(5):725-729.
- [12] 郭书举,史大永,李富超,等. 深海芽孢杆菌 E401B03 次生代谢产物分离和结构鉴定[J]. 海洋科学,2012,36(6):28-30.
Guo S J, Shi D Y, Li F C, et al. Isolation and identification of secondary metabolites produced by a deep-sea *Bacillus* sp. E401B03 [J]. Marine Science, 2012, 36(6):28-30.
- [13] 王萍,漆淑华,黄丽思,等. 南海中华小尖柳珊瑚中嘌呤和嘧啶类化合物的研究[J]. 天然产物研究与开发,2012,24(1):4-7.
Wang P, Qi S H, Huang L S, et al. Purine and pyrimidine analogues from the South China Sea gorgonian *Muricella flexuosa* [J]. Natural Product Research Develops, 2012, 24(1):4-7.
- [14] Saladino R, Crestini C, Neri V, et al. Origin of informational polymers; The concurrent roles of formamide and phosphates [J]. ChemBioChem, 2006, 7(11):1707-1714.
- [15] 邹峥嵘,易杨华,姚新生,等. 海地瓜化学成分研究[J]. 中国天然药物,2004,2(6):348-350.
Zhou Z R, Yi Y H, Yao X S, et al. Studies on chemical constituents of *Acaudina molpadioides* simper [J]. Chinese Journal of Natural Medicines, 2004, 2(6):348-350.
- [16] 张有为,窦德强,陈英杰,等. 人参皂苷对人体骨肉瘤细胞 U₂OS 增殖的影响[J]. 中草药,2001,32(3):232-236.
Zhang Y W, Dou D Q, Chen Y J, et al. Effect of ginsenosides from *Panax ginseng* on proliferation of human osteosarcoma cell U₂OS [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2001, 32(3):232-236.

(责任编辑:陈小玲)

(上接第 340 页 Continue from page 340)

- [9] Hessner K, Reichert K, Dittmer J. Coastal Application of a Wave Monitoring System Based on a Nautical Radar [C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999.
- [10] Alpers W R, Hasselmann K. Spectral signal to clutter and thermal noise properties of ocean wave imaging synthetic aperture radars [J]. International Journal of Remote Sensing, 1982, 3:423-446.
- [11] Nieto-Borge J C, Hessner K, Jarabo-Amores P, et al. Signal-to-noise ratio analysis to estimate ocean wave heights from X-band marine radar image time series [J]. Iet Radar Sonar and Navigation, 2008, 2:35-41.
- [12] Doong D J, Wu L C, Kao C C, et al. Wavelet spectrum extracted from coastal marine radar images [J]. 13th Int Offshore Polar Eng Conf, 2003:258-264.
- [13] Chuang L Z H, Wu L C, Doong D J, et al. Two dimensional continuous wavelet transform of simulated spatial images of waves on a slowly varying topography [J]. Ocean Engineering, 2008, 35:1039-1051.
- [14] Wu L C, Chuang L Z H, Doong D J, et al. Ocean remotely sensed image analysis using two-dimensional continuous wavelet transforms [J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32:8779-8798.
- [15] Chen Z B, He Y J, Zhang B, et al. A new algorithm to retrieve wave parameters from marine X-band radar image sequences [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(7):4083-4091.

(责任编辑:尹 闯)